中国生态农业学报 2016 年 4 月 第 24 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2016, 24(4): 478−488

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150953

减量施氮与间作大豆对蔗田碳平衡特征的影响*

管奥湄 章 莹 刘 宇 罗莎莎 王建武**

(华南农业大学热带亚热带生态研究所/农业部华南热带农业环境重点实验室/华南农业大学广东省高等学校农业生态与农村环境重点实验室 广州 510642)

摘 要 为了研究氮肥投入及豆科作物间作对蔗田碳汇的影响，通过 2 年(2012—2013 年)的大田试验，采用投入产出平衡法(即将作物生育期内的碳投入与碳产出进行量化分析)，探讨 2 个蔗田施氮水平[300 kg·hm^{-2}(减量施氮)和 525 kg·hm^{-2}(常规施氮)]和 4 种种植模式(甘蔗单作、大豆单作、甘蔗||大豆 1 行∶1 行间作及甘蔗||大豆 1 行∶2 行间作)下蔗田生态系统碳的输入和输出特征。结果表明，两种施氮处理甘蔗||大豆 1∶2 间作模式碳输入量均显著高于甘蔗单作和甘蔗||大豆 1∶1 间作模式。2012 年减量施氮处理甘蔗||大豆 1∶2 间作模式碳输出量显著低于甘蔗单作和甘蔗||大豆 1∶1 间作模式，2013 年差异不显著；甘蔗收获后，减量施氮处理甘蔗||大豆两种间作模式土壤碳截存量均显著高于甘蔗单作。甘蔗||大豆间作生态系统的碳收支与平衡分析表明，减量施氮处理甘蔗||大豆 1∶2 间作模式净碳固定量 2012 年为 2 956.35 kg·hm^{-2}，2013 年为 872.59 kg·hm^{-2}。减量施氮处理甘蔗||大豆 1∶2 间作模式下农田固碳潜力大于其他处理，从农业可持续发展角度考虑，该模式具有一定的生态合理性。

关键词 甘蔗||大豆间作 减量施氮 碳输入 碳输出 碳平衡 农田固碳
中图分类号: S344.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)04-0478-11

Effects of reduced nitrogen application and sugarcane-soybean intercropping on carbon balance in sugarcane fields*

GUAN Aomei, ZHANG Ying, LIU Yu, LUO Shasha, WANG Jianwu**

(Institute of Tropical and Subtropical Ecology, South China Agricultural University / Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics , Ministry of Agriculture / Key Laboratory of Agroecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract Intercropping has an outstandingly long history in China. Studies have reported several advantages of cereal-legume intercropping systems, including increased yields, land use efficiency, natural resources utilization, and pest and disease control. This has a huge potential to significantly contribute to the sustainability of modern agriculture. As cereal crop, sugarcane is a major economic crop used in the production of sugar in China. Its wide-row planting space and slow growth rate during initial growth stage provide the required niche of space and resources for intercropping. However, long-term mono-cropping of sugarcane along with the overuse of nitrogen fertilizer has induced severe nitrous pollution in the environment and high cost of agricultural production in South China. Sugarcane-soybean intercropping can reduce nitrogen application while maintaining high crop yield, in turn reducing the overall cost of farming, enriching soil fertility and enhancing soil carbon sequestration in the field. However, few studies have investigated carbon balance under sugarcane intercropping and carbon sequestration in sugarcane intercropping fields. The objective of this study was to determine the

* 国家重大基础研究计划(973 计划)项目(2011CB100400)、国家科技支撑计划项目(2012BAD14B16-04)和广东省科技计划项目(2012A020100003)资助
** 通讯作者: 王建武，主要从事循环农业和转基因作物生物安全方面的研究。E-mail: wangjw@scau.edu.cn
管奥湄，主要从事甘蔗大豆、甜玉米大豆间作效应研究。E-mail: aomeiguan@126.com
收稿日期: 2015−08−31 接受日期: 2015−12−11

* The study was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program, No. 2011CB100400), the National Key Technology R&D Program of China (No. 2012BAD14B16-04) and the Science-technology Project of Guangdong Province (No. 2012A020100003).
** Corresponding author, E-mail: wangjw@scau.edu.cn
Received Aug. 31, 2015; accepted Dec. 11, 2015

effects of sugarcane and soybean intercropping under reduced nitrogen fertilizer on soil carbon balance. This study will further strengthen the scientific basis for the uptake and utilization of soil nutrient and the relationships among nutrition utilization and environmental factors under intercropping systems. To that end, a field experiment was conducted in 2012–2013 in South China Agriculture University. The study analyzed carbon balance and sequestration in farmlands in sugarcane-soybean intercropping systems with crop line ratio of 1∶1, sugarcane-soybean intercropping systems with crop line ratio of 1∶2, monocropped sugarcane (MS) under two nitrogen levels (N1, 300 kg·hm^{-2} and N2, 525 kg·hm^{-2}) and monocropped soybean under zero nitrogen supply during crop growth season. Carbon balance and sequestration in farmland soils were investigated in this study using Input-Output Analysis, where carbon input and output were quantified for crop growth period in order to determine the intensity of carbon sink. The results showed that carbon input under sugarcane-soybean (1∶2) intercropping system was significantly higher than that under monoculture sugarcane and sugarcane-soybean (1∶1) intercropping under two nitrogen application levels. Compared with sugarcane-soybean (1∶1) intercropping and monoculture sugarcane, carbon output under sugarcane-soybean (1∶2) intercropping was significantly decreased with reducing nitrogen application in 2012, although there was no significant difference in 2013. After harvesting sugarcane, soil carbon storage under sugarcane-soybean intercropping systems with reduced nitrogen application was significantly higher than that under monoculture sugarcane. Carbon budget analysis for sugarcane-soybean intercropping systems showed that sugarcane-soybean (1∶2) intercropping was a good net carbon sink with high carbon fixation of 2 956.35 kg·hm^{-2} in 2012, and 872.59 kg·hm^{-2} in 2013 under reduced nitrogen application conditions. It was noted that sugarcane-soybean (1∶2) intercropping with reduced nitrogen application had better carbon storage potential. In addition, the value of land equivalent ratio (LER) of sugarcane-soybean intercropping systems exceeded 1.0 in 2012 and 2013. Also LER of sugarcane-soybean (1∶2) intercropping system with reduced nitrogen application was higher than 1.0. In conclusion, sugarcane-soybean intercropping system (1∶2) with reduced nitrogen application was a feasible production mode for the sustainability of modern agriculture.

Keywords　Sugarcane-soybean intercropping; Reduced nitrogen application; Carbon input; Carbon output; Carbon balance; Soil carbon sequestration

气候变暖已成为全球的热点问题。 其中，人类活动所引起的温室气体增加是引起气候变暖的主要原因，因而如何降低碳排放量成为全世界科学家共同关注的问题[1]。农田生态系统具有极大的固碳潜力[2–3]，不同的灌水、耕作及施肥方式都将直接影响到土壤碳循环，以及生态系统的碳平衡，进而影响碳排放。

在农业生态系统中，碳氮循环是相互依赖、紧密联系的两个过程，氮肥的施用与土壤碳循环有着息息相关的关系。史吉平等[4]通过大量的长期施肥定位试验结果表明，单施有机肥、氮磷钾化肥配施或有机无机肥料配施均可增加土壤有机碳含量。此外，张丽敏等[5]研究表明，与不施肥处理相比，施肥处理提高了土壤有机碳水平，有利于土壤培肥。Thorburn等[6]的研究发现甘蔗(*Saccharum officinarum*)秸秆还田能够提高土壤活性有机碳含量及总碳含量。Manna等[7]、Banger等[8]的研究也得出类似结论。土壤在土地利用变化中既有可能成为碳源，也有可能成为碳汇。现今关于碳平衡的研究方向主要为施肥有利于土壤碳平衡，然而对过量施肥背景下碳平衡的研究较少，对过量施肥的相关研究大部分集中在其所带来的环境效应。此外，间作系统中，由于两种作物更有效地利用了空间、环境资源等，与单作相比，农作物对碳的固定总量有所提升，即碳输入总量提高，农田生态系统达到一个新的碳平衡[9]，有利于提升农田固碳能力。Oelbermann等[10]经过对农林复合系统碳截留潜力研究表明，农林复合生态系统的固碳潜力是不可忽视的。Albrecht等[11]的研究也得出类似结论。此外，在农田生态系统中，张帆等[12]对稻鸭共生系统的碳循环的研究表明，其固碳潜力大于常规固碳。但是目前国内外对于农田生态系统碳平衡的研究主要关注点在于施肥有助于促进农田土壤提高土壤有机碳含量[4–5]及土壤呼吸[13–14]，对于过量施肥背景下氮肥的合理施用或作物的间作对农田生态系统碳平衡的研究较少，而该项研究也将是未来农田生态系统碳循环研究的重要趋势之一。

甘蔗是我国主要的糖料作物，是农民经济收入的重要来源之一，广东是我国三大甘蔗生产区之一，其得天独厚的气候条件非常有利于甘蔗产业的发展[15]。然而，蔗区甘蔗种植缺乏科学指导，普遍存在偏施和过量施用氮肥的情况[16]。我国是世界上甘蔗生产成本较高的国家，其中肥料投入占总成本的30%以上[17]，氮肥的过量施用不仅不能提高甘蔗产量[18]，还会引起一系列的环境问题[19]。因此探讨甘蔗科学栽培及管理的措施显的尤为重要。甘蔗前期生长缓

慢，从下种到封行期至少需90 d，在此期间，光、水分等资源不能被甘蔗充分利用。前人研究证明，间作作物生长期比单作更能有效利用环境资源，此外，间作中两种作物在时间和空间生态位进一步互补扩大[20]。有研究表明豆科||禾本科间作体系中存在种间氮素互补利用机制，即由于禾本科作物竞争吸收土壤氮素，从而减少土壤氮素对固氮酶活性的抑制，进而促进豆科作物的生物固氮[21–23]。因此，在甘蔗种植系统中，与大豆(*Glycine max*)间作，对减少农田管理措施中氮肥的施用量有着重要意义。同时合理的肥料管理措施不仅能提高土壤肥力，还能促进农田生态系统土壤固定碳[24]，并有利于增强农田生态系统碳汇强度[25]。减量施氮及大豆间作对农田生态系统的影响得到了科学家们越来越多的关注[26–27]，但是对于我国甘蔗种植区，减量施氮及大豆间作对蔗田生态系统的碳收支与平衡的研究却少见报道。

研究甘蔗不同种植制度下碳的循环平衡状况，明确典型种植制度下蔗田生态系统碳的源汇问题，对于华南地区蔗田科学施肥及促进农业可持续健康发展具有重要意义。本文通过田间定位试验研究了减量施氮和与大豆间作对蔗田碳平衡与碳循环特征的影响，以期为华南地区甘蔗种植的氮素优化管理提供科学参考。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 试验区概况

甘蔗||大豆间作与减量施氮长期定位试验始于2009 年[28]，在广州市华南农业大学校内农场进行(23°08′N，113°15′E)。该农场地处亚热带，气候属亚热带典型的季风海洋气候，光热资源充足，年日照时数 1 289~1 780 h，太阳辐射总量 105.3 kJ·cm^{-2}，年平均气温 21.9~22.8 ℃，极端最高气温 38.6~39.3 ℃，极端最低气温 0~2.3 ℃，年平均降雨量 1 348~2 278 mm，约 85%的降水集中在 4—8 月。2009 年，长期定位试验开始前，测定试验地土壤为赤红壤，耕层有机质含量 14.81 g·kg^{-1}，碱解氮 41.30 mg·kg^{-1}，速效磷 85.03 mg·kg^{-1}，速效钾 169.38 mg·kg^{-1}。

1.2 材料与试验设计

1.2.1 供试材料

供试甘蔗品种为‘粤糖 00-236’，其特点是特早熟，高糖，高产，萌芽快而整齐，萌芽率高，分蘖力强，成茎率高；供试大豆品种为‘毛豆 3’，为早熟品种，生育期约 100 d。

1.2.2 试验设计

试验设计与章莹等[19]相同。本试验采用施氮水平、种植模式双因素设计。参考当地蔗农习惯施氮量，试验施氮水平设置常规施氮525 kg·hm^{-2}和减量施氮300 kg·hm^{-2} 2个施氮水平；4种种植模式中3种甘蔗种植模式为甘蔗单作、甘蔗||大豆1∶1(行比)间作、甘蔗||大豆1∶2(行比)间作，一个不施肥的大豆单作对照，共设7个处理(表1)。试验采取随机区组设计，3次重复，每重复为1个小区，小区长5.5 m，宽4.8 m，小区面积 26.4 m^2。甘蔗行距120 cm，每小区均种植4行，每行 38 段双芽苗；大豆行距30 cm，株距 20 cm，大豆单作16行，每行种25穴。每穴在苗期定植 2株。甘蔗||大豆1∶1和甘蔗||大豆1∶2间作为甘蔗种植4行、大豆分别种植 4 行和 8 行(图1)。

表 1 甘蔗||大豆间作田间试验设计
Table 1 Field experiment design of sugarcane||soybean intercropping

处理 Treatment	蔗田施氮水平 Nitrogen rate of sugarcane (kg·hm^{-2})	种植模式 Cropping pattern
MS-N1	300	甘蔗单作 Sugarcane monoculture
SB1-N1	300	甘蔗||大豆(1 行∶1 行) Sugarcane||soybean 1∶1 intercropping
SB2-N1	300	甘蔗||大豆(1 行∶2 行) Sugarcane||soybean 1∶2 intercropping
MS-N2	525	甘蔗单作 Sugarcane monoculture
SB1-N2	525	甘蔗||大豆(1 行∶1 行) Sugarcane||soybean 1∶1 intercropping
SB2-N2	525	甘蔗||大豆(1 行∶2 行) Sugarcane||soybean 1∶2 intercropping
MB	0	大豆单作 Soybean monoculture

1.2.3 田间管理

2012 年田间试验于 2 月 25 日播种甘蔗，3 月 10 日种植大豆，6 月 3 日收获大豆，12 月 16 日收获甘蔗。2 月 24 日施基肥氯化钾 150 kg·hm^{-2}、过磷酸钙 1 050 kg·hm^{-2}、复合肥(N∶P∶K=15∶15∶15)750 kg·hm^{-2}；5 月 3 日追施攻蘖肥，追施氯化钾 300 kg·hm^{-2}，常规施氮处理追施尿素 225 kg·hm^{-2}，减量施氮处理追施尿素 113 kg·hm^{-2}；6 月 27 日施攻茎肥，常规施氮处理追施尿素 672 kg·hm^{-2}，减量施氮处理追施尿素 295 kg·hm^{-2}。2013 年于 3 月 9 日播种甘蔗，3 月 16 日种植大豆，6 月 3 日收获大豆，12 月 8 日收获甘蔗。3 月 8 日施基肥，5 月 5 日追施攻蘖肥，6 月 30 日施攻茎肥。2013 年田间试验除甘蔗大豆播种施肥日期等不同，其余田间管理，施肥量、追肥量同 2012 年。甘蔗||大豆间作种植采用畦沟模式，大豆种植在畦上，

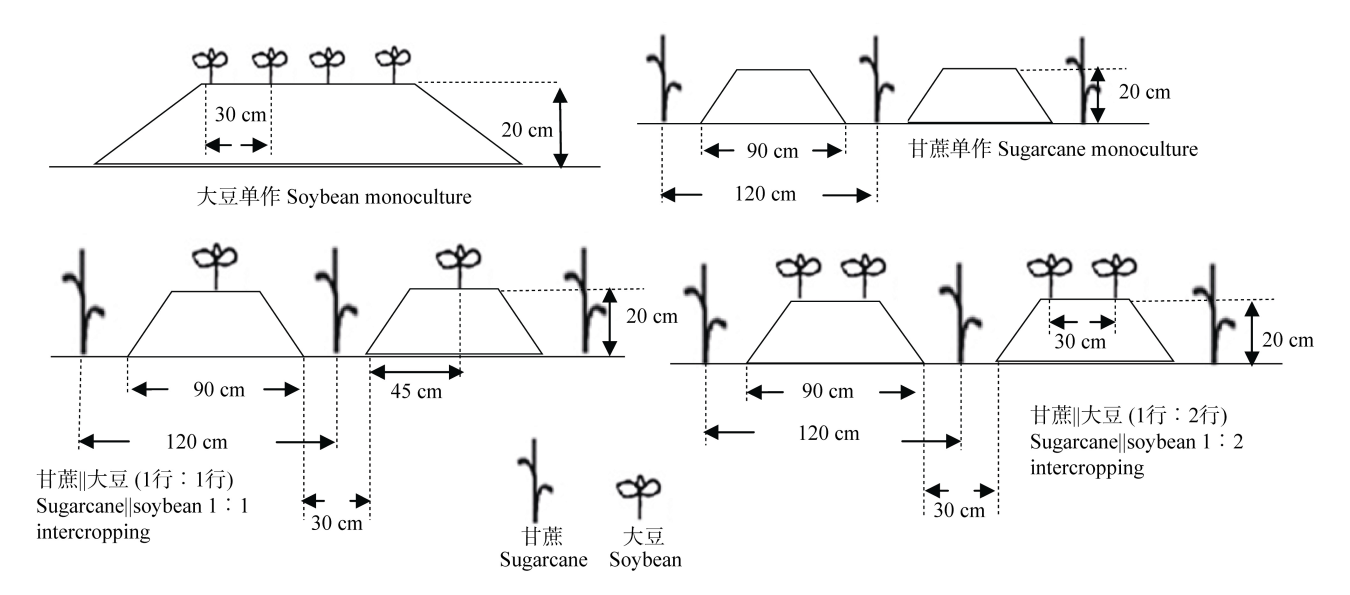


图 1　甘蔗||大豆间作和单作种植示意图

Fig. 1　Schematic diagrams of different sugarcane||soybean intercropping systems and monoculture systems

畦宽 90 cm，甘蔗种植在沟里，沟宽 30 cm。基肥施于种植甘蔗的沟里，然后覆土 5 cm，以后追肥全部施在种植甘蔗的沟内，再培土，大豆整个生育期不施肥，大豆收获后将叶和茎秆还田于蔗行，并覆土，最后畦成为沟，有利于排水。其他田间管理与当地甘蔗种植保持一致。

1.3　样品采集与测定方法

1.3.1　植株样品采集及测定

2012 年 6 月 3 日每小区随机取 5 株大豆，将大豆茎叶、荚、根分开后 105 ℃下杀青 30 min，80 ℃烘干 48 h 至恒重，测定全碳含量[29]。大豆茎叶、根全碳含量计入碳输入量的秸秆还田部分，荚全碳含量计入碳输出量的大豆收获部分。12 月 16 日每小区连续选取有代表性的甘蔗 3 株。植株取样后 105 ℃下杀青 30 min，80 ℃烘干 60 h 至恒重，测定全碳含量[29]。2013 年测定方法同 2012 年。

1.3.2　凋落物测定

2012 年 9 月 2 日甘蔗剥叶，每小区收集 3 株剥下来的蔗叶烘干、磨碎测定全碳含量[29]，计入凋落物输入量。2013 年 9 月 18 日甘蔗剥叶，其余处理同 2012 年。

1.3.3　土壤样品采集及测定

2012 年分别于 2 月 24 日(试验前)和 12 月 17 日(试验后)，在各处理距甘蔗 20 cm 的甘蔗||大豆间作带取样，每带取样深度为表层 0~30 cm，每带取 3 个点混合，鲜土取回后风干，研磨，过筛，用于测定土壤全碳含量[29]。2013 年分别于 3 月 8 日(试验前)和 12 月 11 日(试验后)取土样，其余测定方法同 2012 年。

1.3.4　化肥含碳量的计算

化肥含碳量参照 West 等[30]的“全碳”分析方法进行估算，化肥含碳量=化肥施用量×0.895 6。各处理投入的化肥所带入的碳量见表 2。

表 2　各处理化肥所带入的碳量

Table 2　Input amounts of carbon by fertilizers application of different treatments

处理 Treatment	MS-N1	SB1-N1	SB2-N1	MS-N2	SB1-N2	SB2-N2	MB
碳输入法 C input [kg(C)·hm^{-2}]	268.68	268.68	268.68	470.19	470.19	470.19	0

1.3.5　种子碳的计算

根据种植要求，甘蔗每个小区需要 16 株蔗种，每公顷需 6 000 株，根据收获的甘蔗碳含量平均数为 443.30 g·株$^{-1}$，每公顷蔗种含有碳素为 2 659.80 kg。甘蔗||大豆间作模式下每公顷需大豆种子 3.03×10^{5} 粒，大豆单作需 6.06×10^{5} 粒。取 10 粒豆种烘干磨碎测定含碳量为 477.89 g·kg^{-1}，甘蔗||大豆 1∶1 间作模式下豆种含碳 651.67 kg·hm^{-2}，甘蔗||大豆 1∶2 间作模式下豆种含碳 1 303.34 kg·hm^{-2}，大豆单作模式下豆种含碳 2 606.67 kg·hm^{-2}。

1.3.6　气体的采集与分析

从甘蔗种植起，每隔 14 d(如遇下雨天气则相应推迟或提前)，采用静态箱–气相色谱法，在甘蔗、大豆植株基部中间的位置设置 2 个测试样点，每个处理各 3 个小区，每个小区两个测试样点。田间静态箱的设置参照 Dyer [31]的方法，静态箱为直径 11 cm

的圆形 PVC 管，长度为 25 cm，底端插入土壤 10 cm。静态箱上端盖有直径为 11 cm 聚氯乙烯材质的管帽。管帽中间有 1 个直径 2 cm 的采样孔，并用橡胶塞封住。采样孔旁边还装置有一条长度为 10 cm、直径为 6 mm 的导气管，用来平衡静态箱内外的气压。具体操作为在晴朗天气下白天 9:00—11:00 时，选择适合的时间，在 t=0、t=15 min、t=30 min 时完成 3 次气体采样。用 50 mL 注射器插入采样口，采集气体时先来回抽动注射器的活塞 3 次将静态箱内的气体混匀。采集气体后迅速将注射器放入做好标记的密封袋里，迅速拿回实验室进行气相色谱仪分析。气相色谱仪采用意大利产 TRACE GC 2000。CO_2 检测器 ECD，检测温度 300 ℃，炉温 80 ℃；CH_4 检测器 FID，检测温度 300 ℃，炉温 80 ℃，载气为高纯 N_2。温室气体排放通量参照万运帆等[32]方法进行计算，加权求生育期温室气体累积排放总量。温室气体排放通量的计算公式为：

$$F=\frac{\Delta_m}{A\times\Delta_t}=\frac{m_2-m_1}{A\times\Delta_t}=\frac{C_2\times V\times M_0\times\frac{273}{T_2}-C_1\times V\times M_0\times\frac{273}{T_1}}{A\times(t_2-t_1)\times22.4} \quad (1)$$

式中：F 为气体排放通量，$mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$，正值为排放，负值为吸收；$A$ 为取样箱的底面积(m^2)；V 为取样箱体积(m^3)；M_0 为测定气体的分子质量；m_1、m_2 分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内某温室气体的质量(mg)；t_1、t_2 为测定开始和测定结束的时间；C_1、C_2 分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内温室气体的体积浓度；T_1、T_2 分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内温度(K)。

1.3.7 土地当量比

土地当量比(Land Equivalent Ratio, LER)常被用于衡量间作优势，计算公式如下：

$$LER=Y_{ib}/Y_{sb}+Y_{is}/Y_{ss} \quad (2)$$

式中：Y_{is}、Y_{ib} 分别为间作甘蔗、大豆的产量($t\cdot hm^{-2}$)；Y_{ss}、Y_{sb} 分别为单作甘蔗、大豆的产量($t\cdot hm^{-2}$)；若 LER>1，表明有间作优势；若 LER<1，为间作劣势[33]。

1.4 数据处理及统计方法

长期定位试验从 2009 年开始，而本文碳平衡试验从 2012 年开始。因此本试验土地当量比采用 2009—2013 年的数据，其余则采用 2012 年、2013 年的数据。采用 Microsoft Excel 2003 软件作表，用 SPSS 13.0 软件统计分析数据。不同处理之间多重比较采用 Duncan 新复极差法，图表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 不同种植制度的土地当量比

2009—2013 年甘蔗||大豆间作系统的土地当量比(基于作物产量)如图 2 所示，2009—2013 年期间各间作模式的土地当量比均大于 1，为 1.10~1.84，说明甘蔗||大豆间作能提高单位面积的土地利用率，具有一定的产量优势。N1(减量施氮)水平下，SB2(甘蔗||大豆 1∶2 间作)模式土地当量比在 2009—2013 年均显著高于 SB1(甘蔗||大豆 1∶1 间作)；N2(常规施氮)水平下，SB2 模式土地当量比在 2013 年显著高于 SB1 模式。总体来看，5 年的数据均表明 SB2-N1 处理的 LER 值大于其他种植模式且年际间没有显著变化，间作优势最明显且稳定，表明减量施氮处理对甘蔗||大豆 1∶2 间作模式下农田生态系统产量有优势。从成本节约角度和甘蔗产量维持角度来考虑，减量施氮水平下的甘蔗||大豆 1∶2 间作模式具有一定的可行性。

2.2 不同种植制度农田土壤碳库的变化

由表 3 可知，2012 年甘蔗||大豆间作系统土壤碳截存量均高于甘蔗单作，2013 年甘蔗||大豆间作系统

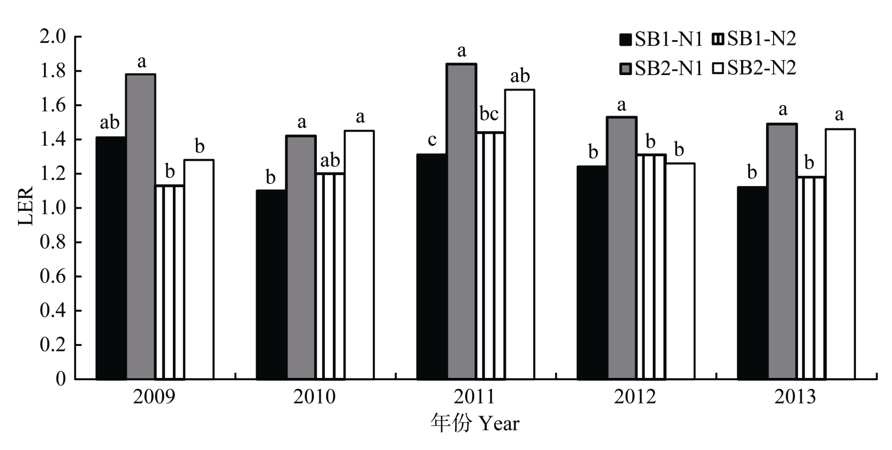


图 2 2009—2013 年不同甘蔗||大豆间作系统的土地当量比(LER)

Fig. 2 Land equivalent ratios (LER) of different sugarcane||soybean intercropping systems during 2009—2013

表 3　2012—2013 年甘蔗||大豆间作与单作的土壤碳库变化

Table 3　Soil carbon pool of sugarcane and soybean intercropping and monocropping systems in 2012 and 2013

年份 Year	处理 Treatment	种植前 Before planting		收获后 After harvest		土壤截存碳量 Soil C sequestration (kg·hm^{-2})
		碳含量 C content (g·kg^{-1})	土壤碳库 Soil carbon pool (kg·hm^{-2})	全碳含量 Total C content (g·kg^{-1})	土壤碳库 Soil carbon pool (kg·hm^{-2})	
2012	MS-N1	7.27±0.86a	2 509.83±401.89a	7.86±0.29b	2 682.02±108.03b	172.19±307.62b
	SB1-N1	7.94±0.25a	2 934.40±228.44a	8.94±0.82ab	3 346.42±246.60ab	412.02±258.93a
	SB2-N1	7.53±0.21a	2 641.75±138.01a	8.88±0.46ab	3 101.00±466.60ab	459.25±360.50a
	MS-N2	8.06±0.75a	3 053.85±250.93a	8.49±0.24ab	3 257.19±332.88ab	203.34±213.44b
	SB1-N2	7.91±0.42a	3 092.31±217.88a	8.49±0.23ab	3 309.74±35.41ab	217.43±245.74b
	SB2-N2	7.51±0.51a	2 768.21±335.82a	8.77±0.33ab	3 242.42±201.13ab	474.21±312.84a
	MB	8.44±0.40a	3 191.98±29.26a	9.70±0.57a	3 683.24±276.54a	491.25±286.54a
2013	MS-N1	8.46±1.04a	2 914.66±463.42a	8.16±0.70abc	2 796.93±312.25a	−117.74±167.51ab
	SB1-N1	8.84±0.23a	3 091.54±18.68a	9.11±0.18ab	3 192.77±108.45a	101.23±120.08a
	SB2-N1	8.70±0.12a	3 219.88±265.11a	8.71±0.13abc	3 233.87±330.15a	13.99±88.12ab
	MS-N2	8.29±0.58a	3 200.96±457.27a	7.87±0.29c	3 035.95±380.33a	−165.02±127.38ab
	SB1-N2	8.51±0.35a	3 312.86±71.48a	8.31±0.44abc	3 236.49±137.30a	−76.37±127.40ab
	SB2-N2	8.90±0.41a	3 277.15±68.81a	7.82±0.05c	2 889.64±148.78a	−387.51±138.59b
	MB	8.80±0.53a	3 333.83±191.42a	9.40±0.12a	3 567.44±154.93a	233.61±165.40a

数值为平均值±标准误，同一年份同列数据后不同小写字母表示利用 Duncan 检验差异显著(P<0.05)。下同。Values are mean ± SE. Different small letters in the same column for the same year mean significant difference at 5% level. The same below.

土壤碳截存量除 SB2-N2 外均高于甘蔗单作。两年结果均表明，SB1-N1、SB2-N1 处理土壤碳截存量显著高于甘蔗单作。然而，由于大豆的共生固氮作用，MB 处理土壤碳截存量显著高于其他各个处理。2013 年 MS-N1、MS-N2、SB1-N2、SB2-N2 处理土壤截存碳量为负值，说明甘蔗收获后农田土壤碳库呈现亏缺。

2.3　不同种植制度农田土壤 CO_2 和 CH_4 排放总量

甘蔗||大豆间作农田土壤 CO_2 和 CH_4 季节排放总量见表 4。由表 4 可知，2012 年 N1 水平下，SB2 模式土壤 CO_2 累积排放总量显著低于 SB1 和 MS 模式，而 2013 年 SB2 模式土壤 CO_2 累积排放总量表现相似规律，但差异不显著。而在 N2 水平下，2012 年土壤 CO_2 累积排放总量各处理间差异均不显著。双因素方差分析表明，间作模式和施氮水平互作对土壤 CO_2 累积排放总量产生了极显著影响，不同间作模式对土壤 CO_2 累积排放总量产生了显著影响。2013 年 N2 水平下 SB1 模式土壤 CO_2 累积排放总量

表 4　2012—2013 年甘蔗||大豆间作及单作农田土壤 CO_2 和 CH_4 累积排放总量

Table 4　Soil CO_2 and CH_4 accumulated emission of sugarcane and soybean intercropping and monocropping systems in 2012 and 2013　kg(C)·hm^{-2}

处理 Treatment	2012		2013	
	CO_2	CH_4	CO_2	CH_4
MS-N1	5 096.89±137.12ab	−13.68±1.74ab	2 676.92±250.55ab	−0.42±0.90a
SB1-N1	6 422.69±791.95a	−21.78±8.31b	3 117.74±515.68ab	−0.95±0.37a
SB2-N1	3 283.20±535.71c	−12.72±3.35ab	2 763.93±345.75ab	−1.49±1.29a
MS-N2	4 103.29±560.66bc	−5.53±1.10a	2 451.77±319.68ab	−0.34±0.64a
SB1-N2	4 475.84±158.22bc	−11.36±2.62ab	2 317.94±292.26b	−1.23±0.85a
SB2-N2	4 775.31±486.46bc	−4.77±4.31a	3 461.51±264.42a	−0.73±0.74a
MB	4 780.35±255.29bc	−9.97±3.36ab	2 509.31±134.28ab	−0.11±0.11a
双因素方差分析结果 Results of two-way ANOVA test (F)				
施氮量 N level (N)	0.84	3.38	0.05	1.44
种植模式 Intercropping pattern (P)	4.54*	2.13	0.96	1.10
种植模式×施氮量 P×N	7.01**	0.05	0.62	1.88

*表示显著差异(P<0.05), **表示极显著差异(P<0.01)。* and ** refer to significant difference at 5% and 1% levels, respectively.

显著低于 SB2 模式，不同的施氮水平和间作模式对土壤 CO_2 累积排放通量没有产生显著影响。各处理 CH_4 的累积排放总量均为负值，说明甘蔗||大豆间作农田土壤是 CH_4 的一个弱吸收汇，且间作模式和施氮水平对土壤 CH_4 累积排放总量没有产生显著影响。

2.4 不同种植制度下蔗田土壤的碳循环

由表 5 可知，甘蔗||大豆间作、甘蔗单作、大豆单作系统的碳输入、碳输出及碳归还量各不相同。各处理系统碳输入主要是化学肥料、蔗种、豆种和凋落物。其中, 2012 年 N1 水平下 SB2 模式农田碳输入量显著高于 SB1 模式和甘蔗单作，分别升高了 11.25%和 25.11%; 2013 年也表现出同样规律，分别升高 11.68%和 21.74%。此外，两年结果均表明 N2 水平下 SB2 模式农田碳输入量显著高于甘蔗单作。同时各间作模式农田碳输入量均显著高于大豆单作，主要原因是豆种为大豆单作主要碳的来源。各系统碳的输出主要是大豆收获豆荚带走的碳、甘蔗收获带走碳以及土壤温室气体 CO_2 排放带走的碳。各处理样地 CH_4 的累积排放总量均为负值，说明旱地农田对 CH_4 有吸收的作用。其中, 2012 年 SB2-N1 处理碳输出量为 4 859.46 $kg \cdot hm^{-2}$，较 MS-N1 和 SB1-N1 处理降低 28.87%和 41.5%; 2013 年减量施氮水平下，不同处理间农田碳输出量均没有显著差异，SB2-N2 处理农田碳输出量显著高于 SB1-N2 处理和 MS-N2 处理，分别高 36.23%和 43.59%。归还给系统的碳是大豆收获茎、叶和根，由于不同间作模式大豆种植行数不同，因此，MB 处理碳归还量显著高于各间作模式，各间作模式间没有显著差异。

2.5 不同种植制度下农田土壤的碳收支与平衡

蔗田生态系统的碳收支与平衡包括化肥种子等的投入、土壤碳截存量、大豆收获的归还量、CH_4 和 CO_2 的排放量及作物收获带走的碳量。其中，总输入项为输入、土壤截存碳量和归还量，总输出项为 CH_4 和 CO_2 的排放量及作物收获带走的碳量。由表 6 可知，在 2012 年所有处理中，MS-N1、SB1-N1 和 MB 处理输出项大于输入项，表现为碳源，其余处理均表现为碳汇，其中 SB2-N1 处理净碳固定值最大，达 2 956.35 $kg \cdot hm^{-2}$。2013 年, MS-N1、MS-N2 和 SB2-N2 处理输出项大于输入项，表现为碳源，而其余处理均表现为碳汇，其中 SB2-N1 处理固碳潜力最大，净碳固定为 872.59 $kg \cdot hm^{-2}$。两年结果均表明, SB2-N1 模式下，土壤固碳潜力最大。

3 讨论与结论

施用农田氮肥的最终目的是保证作物的高产出，而氮肥管理的目的是既保证高产又不会损害环境，从而达到经济效益和环境效益的协同统一[34]。甘蔗与大豆间作，一方面可合理利用光等环境资源，另一方面可减少蔗田化学氮肥的施用。本研究中，与农民习惯施氮量 525 $kg \cdot hm^{-2}$ 相比，减量施肥(N 300 $kg \cdot hm^{-2}$)处理并没有影响甘蔗产量，且 5 年里减量施氮甘蔗||大豆 1∶2 间作模式最明显且年际间变化稳定，说明在保证甘蔗产量的同时进行减量施肥是可行的。雍太文等[35]的研究也表明，在玉米||大豆间作系统中，与农民习惯施氮肥用量(240 $kg \cdot hm^{-2}$)相比，减量施氮(180 $kg \cdot hm^{-2}$)下，玉米和大豆的产量、经济系数、养分吸收利用率等都显著提高。张爱平等[36]提出研究氮肥使用合理与否，需注意除了探究氮肥的增产效果外，还需考虑在土壤中残留无机氮的高低。因此不同地区土壤起始无机氮和土壤净矿化水平可能是影响植株最终施氮量的重要原因，因此，氮肥合理运用要考虑不同地区、不同肥力水平的土壤状况。

有研究表明氮肥的施用促进了土壤中 CO_2 的排放，其原因可能是促进了微生物的活动等[37–38]。在本研究中，经双因素方差分析表明，2012 年施氮量对 CO_2 的排放有显著影响，但 2013 年 CO_2 累计排放总量并没有出现此现象，主要原因可能是受降雨等天气环境和采样时间的影响。此外在本研究中，以累计排放总量来看土壤是一个 CH_4 弱汇，且各处理对农田土壤 CH_4 的累积排放并没有产生显著影响。陈琛等[39]提出不同肥料种类、施肥方式、施肥量都会对 CH_4 排放造成一定的影响，其中施肥处理的 CH_4 排放量明显高于无肥处理的温室气体排放量。其原因可能是长期施肥，促进了微生物的活动，引起了温室气体平均排放通量的增大[40]。

甘蔗||大豆间作生态系统中相同施氮水平甘蔗||大豆 1∶2 间作模式农田碳输入量显著高于甘蔗||大豆 1∶1 间作模式和甘蔗单作，其主要原因是大豆播种量的提高，通过作物种子带入的碳素是农田生态系统中碳的最主要来源，而在不同施氮模式下，通过氮肥带来的碳素也是不同的。在本试验中，减量施氮带来的碳素远远低于常规施氮，常规施氮的氮肥用量已远远超过了作物对氮素的需求量。而农田碳素输出主要包括地上部分作物收获碳量、以 CO_2 形式排放损失量、以 CH_4 形式排放损失量等。甘蔗||大豆间作生态系统中相同间作模式情况下，甘蔗||大豆 1∶2 间作模式下常规施氮的农田碳输出量显著高于减量施氮的农田碳输出量，其主要原因是氮肥使用量的增加，促进了农田 CO_2 的排放，这与

表 5 2012—2013 年甘蔗||大豆间作与单作处理的农田碳循环

Table 5 Carbon cycle of sugarcane and soybean intercropping and monocrop systems in 2012 and 2013 kg·hm^{-2}

年份 Year		项目 Item	MS-N1	SB1-N1	SB2-N1	MS-N2	SB1-N2	SB2-N2	MB
2012	输入 Input	化肥 Fertilization	268.68	268.68	268.68	470.19	470.19	470.19	—
		蔗种 Sugarcane seed	2 659.80±99.62	2 659.80±99.62	2 659.80±99.62	2 659.80±99.62	2 659.80±99.62	2 659.80±99.62	—
		豆种 Bean seed	—	651.67±34.02	1 303.34±27.90	—	651.67±34.02	1 303.34±27.90	2 606.67±26.03
		凋落物 Litter	2 607.04±189.72a	2 644.78±213.45a	2 693.55±241.20a	2 673.32±220.11a	2 648.99±219.51a	2 671.47±219.88a	—
		合计 Total	5 535.52±56.86f	6 224.93±32.03d	6 925.37±43.34b	5 803.31±44.84e	6 430.65±21.01c	7 104.80±29.83a	2 606.68±26.03g
	输出 Output	大豆收获 Bean harvest	—	181.86±9.01d	368.63±14.28b	—	209.77±10.14cd	277.73±12.10c	550.26±58.19a
		甘蔗收获 Sugarcane harvest	1 748.15±153.93a	1 726.43±145.03a	1 220.36±32.67ab	1 617.13±98.81ab	1 494.43±177.68ab	1 659.10±86.94a	—
		CH_4 排放 CH_4 emission	−13.68±1.74ab	−21.78±8.31b	−12.73±3.35ab	−5.53±1.10a	−11.36±2.62ab	−4.77±4.31a	−9.97±3.36ab
		CO_2 排放 CO_2 emission	5 096.89±137.12ab	6 422.69±791.95a	3 283.20±535.71c	4 103.29±560.66bc	4 475.84±158.22bc	4 775.31±486.46bc	4 780.35±255.29bc
		合计 Total	6 831.36±31.01ab	8 309.22±942.62a	4 859.46±489.38c	5 714.86±556.24bc	6 186.69±275.77bc	6 707.37±409.36b	5 320.63±162.459bc
	归还量 Return	大豆秸秆 Straw	—	294.29±31.53bc	431.19±90.93bc	—	271.90±33.84c	459.64±52.37b	800.01±5.80a
2013	输入 Input	化肥 Fertilization	268.68	268.68	268.68	470.19	470.19	470.19	—
		蔗种 Sugarcane seed	2 720.47±63.97	2 720.47±63.97	2 720.47±63.97	2 720.47±63.97	2 720.47±63.97	2 720.47±63.97	—
		豆种 Bean seed	—	651.67±34.02	1 303.34±27.90	—	651.67±34.02	1 303.34±27.90	2 606.67±26.03
		凋落物 Litter	1 815.10±202.03	1 596.21±102.27	1 556.24±201.83	1 500.81±49.68	1 601.29±353.09	1 472.42±103.34	—
		合计 Total	4 804.25±200.59c	5 237.02±112.77bc	5 848.72±214.42a	4 691.47±45.46c	5 443.62±331.27ab	5 966.42±103.37a	2 606.67±26.03d
	输出 Output	大豆收获 Bean harvest	—	177.38±7.47c	376.20±21.93b	—	204.32±5.50c	302.04±192.63b	555.23±51.23a
		甘蔗收获 Sugarcane harvest	2 718.14±241.23ab	2 350.41±221.19ab	2 313.83±220.08ab	2 613.48±239.75ab	2 817.27±252.55ab	3 509.73±321.48a	—
		CH_4 排放 CH_4 emission	−0.42±0.90a	−0.95±0.37a	−1.49±1.29a	−0.34±0.64a	−1.23±0.85a	−0.73±0.74a	−0.11±0.11a
		CO_2 排放 CO_2 emission	2 676.92±250.55ab	3 117.74±515.68ab	2 763.93±345.75ab	2 451.77±319.68ab	2 317.94±292.26b	3 461.51±264.42a	2 509.31±134.28ab
		合计 Total	5 394.64±249.68b	5 644.58±513.57b	5 452.46±368.44b	5 064.91±319.10b	5 338.29±288.01b	7 272.55±269.94a	3 064.42±144.67c
	归还量 Return	大豆秸秆 Straw	—	309.76±24.18b	462.34±105.79b	—	280.11±36.82b	462.51±53.70b	795.4±23.06a

表 6 2013 年甘蔗||大豆间作与单作处理的农田碳收支与平衡

Table 6 Carbon budget and carbon balance from intercropping and monocropping of sugarcane and soybean in 2013 kg·hm^{-2}

年份 Year	项目 Item	MS-N1	SB1-N1	SB2-N1	MS-N2	SB1-N2	SB2-N2	MB
2012	碳输入 C input	5 535.52±56.86f	6 224.93±32.03d	6 925.37±43.34b	5 803.31±44.84e	6 430.65±21.01c	7 104.80±29.83a	2 606.68±26.03g
	土壤截存碳量 Soil C sequestration	172.19±307.62b	412.02±258.93a	459.25±360.50a	203.34±213.44b	217.43±245.74b	474.21±312.84a	491.25±286.54a
	碳归还量 Returned C	—	294.29±31.53bc	431.19±90.93bc	—	271.90±33.84c	459.64±52.37b	800.00±5.80a
	碳输出 C output	6 831.36±31.01ab	8 309.22±942.63a	4 859.46±489.38c	5 714.86±556.24bc	6 186.69±275.77bc	6 707.37±409.36b	5 320.63±162.59bc
	碳收支与平衡 C balance	−1 123.70±225.11c	−1 378.00±986.78c	2 956.35±552.02a	291.79±442.34bc	733.29±157.78b	1 331.28±359.03b	−1 422.69±339.57d
2013	碳输入 C input	4 804.25±200.59c	5 237.02±112.77bc	5 848.72±214.42a	4 691.47±45.46c	5 443.62±331.27ab	5 966.42±103.37a	2 606.67±26.03d
	土壤截存碳量 C sequestration	−117.74±167.51ab	101.23±120.08a	13.99±88.12ab	−165.02±127.38ab	−76.37±127.40ab	−387.51±138.59b	233.61±165.40a
	碳归还量 Returned C	—	309.76±24.18b	462.34±105.79b	—	280.11±36.82b	462.51±53.70b	795.40±23.06a
	碳输出 C output	5 394.64±249.68b	5 644.58±513.57b	5 452.46±368.44b	5 064.91±319.10b	5 338.29±288.01b	7 272.55±269.94a	3 064.42±144.67c
	碳收支与平衡 C balance	−708.13±53.79bc	3.44±553.78abc	872.59±478.30a	−538.46±372.61bc	309.06±487.73ab	−1 231.13±347.68c	571.27±337.45ab

Dick[41]的研究结果一致。而甘蔗||大豆1∶1间作模式下常规施氮农田CO_2排放量则是低于减量施氮模式下的农田CO_2排放量，这与Burton等[42]和DeForest等[43]的研究结果一致，其原因可能是因为氮肥的施用降低了土壤中胞外酶的活性，减少了真菌群落，因此导致土壤CO_2排放量降低。在本试验中这两种现象均有体现，除上述所说原因外，具体原因还需进一步长期定位试验来研究。此外，2013年由甘蔗收获带出的碳输出远远高于2012年，其原因可能是甘蔗生育期较长，再加上大田试验非常容易受到天气因素等的影响。2012年甘蔗在后期生长时受台风影响，发生了较严重的倒伏，直接影响了甘蔗后期的生长，从而导致2012年和2013年两年间由甘蔗收获带出的碳量差异较大，进而导致净碳固定量差异较大。

尹云锋等[9]对不同施肥条件下潮土碳平衡的研究表明，施肥不但影响了耕层土壤有机碳含量，也影响着耕层土壤有机碳储量，施肥处理促进了潮土的碳固定。黄晶等[44]研究表明，在对小麦、玉米有机无机肥配施处理(NPKM)下，系统均表现为大气CO_2的“汇”。本研究发现，甘蔗||大豆不同间作模式下，除SB2-N2模式以外，其余模式均表现为碳汇现象，而SB2-N2模式和甘蔗单作表现为碳源，其原因可能是SB2-N2模式下CO_2排放量明显高于其他处理，且在甘蔗单作系统中，所有甘蔗均被作为产量收走，没有秸秆还田部分，其归还量为0。此外，在所有处理中，SB2-N1处理固碳潜力最大，净碳固定为2 956.35 kg·hm^{-2}(2012年)和 872.59 kg·hm^{-2}(2013年)。李银坤等[45]的研究结果表明，其农田生态系统固碳量为6 829.1~8 950.2 kg·hm^{-2}，明显高于本研究结果。其主要原因可能是计算方法和监测时间长短不同；此外不同地域自然条件特点、不同作物类型、种植模式以及田间管理措施等的不同也是造成上述估算结果差异的重要因素。

氮肥的施用可以促进碳的固定，然而氮肥的过量施用，不仅不会提高产量，反而会影响农田生态系统土壤养分的良好循环。本研究表明，间作及减量施氮能够显著提高系统土地当量比，同时，SB2-N1 种植模式下，土壤处在良好碳汇情况下。因此，合理减量施氮及间作被认为是可行的可持续农业发展方式。

参考文献 References

[1] Sierra M, Martínez F J, Verde R, et al. Soil-carbon sequestration and soil-carbon fractions: Comparison between poplar plantations and corn crops in south-eastern Spain[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 1–6

[2] Lal R. Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems[J]. Food Policy, 2011, 36(S1): S33–S39

[3] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 612–619
Han B, Wang X K, Lu F, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 612–619

[4] 史吉平, 张夫道, 林葆. 长期施肥对土壤有机质及生物学特性的影响[J]. 土壤肥料, 1998(3): 7–11
Shi J P, Zhang F D, Lin B. Effect of long-term fertilization on soil organic matter and biological characteristics[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 1998(3): 7–11

[5] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3817–3825
Zhang L M, Xu M G, Lou Y L, et al. Changes in yellow paddy soil organic carbon fractions under long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(19): 3817–3825

[6] Thorburn P J, Meier E A, Collins K, et al. Changes in soil carbon sequestration, fractionation and soil fertility in response to sugarcane residue retention are site-specific[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 120: 99–111

[7] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2): 397–409

[8] Banger K, Toor G S, Biswas A, et al. Soil organic carbon fractions after 16-years of applications of fertilizers and organic manure in a Typic Rhodalfs in semi-arid tropics[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 86(3): 391–399

[9] 尹云锋, 蔡祖聪. 不同施肥措施对潮土有机碳平衡及固碳潜力的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6): 745–749
Yin Y F, Cai Z C. Effect of fertilization on equilibrium levels of organic carbon and capacities of soil stabilizing organic carbon for fluvo-aquic soil[J]. Soils, 2006, 38(6): 745–749

[10] Oelbermann M, Voroney R P, Thevathasan N V, et al. Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and southern Canadian alley cropping system[J]. Agroforestry Systems, 2006, 68(1): 27–36

[11] Albrecht A, Kandji S T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 99(1/3): 15–27

[12] 张帆, 高旺盛, 隋鹏, 等. “双季稻–鸭”共生生态系统 C 循环[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3198–3208
Zhang F, Gao W S, Sui P, et al. Carbon cycling from rice-duck mutual ecosystem during double cropping rice growth season[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(10): 3198–3208

[13] 黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 156–160
Huang B, Wang J G, Gong Y S, et al. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1): 156–160

[14] 牛灵安, 郝晋珉, 张宝忠, 等. 长期施肥对华北平原农田土壤呼吸及碳平衡的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3):

1054–1060
Niu L A, Hao J M, Zhang B Z, et al. Soil respiration and carbon balance in farmland ecosystems on North China Plains[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 1054–1060
[15] 陈月桂, 吴建涛, 杨俊贤, 等. 广东省甘蔗产业发展战略研究[J]. 广东农业科学, 2012(5): 165–168
Chen Y G, Wu J T, Yang J X, et al. Development strategy analysis of sugarcane industry in Guangdong Province[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012(5): 165–168
[16] 周修冲, 刘国坚, Portch S, 等. 高产甘蔗营养特性及钾、硫、镁肥效应研究[J]. 土壤肥料, 1998(3): 26–28
Zhou X C, Liu G J, Portch S, et al. Effect of fertilizer K, S, Mg and nutrient characteristics of high yield sugarcane[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 1998(3): 26–28
[17] 敖俊华, 江永, 黄振瑞, 等. 加强甘蔗养分管理, 降低甘蔗生产成本[J]. 广东农业科学, 2011(23): 31–34
Ao J H, Jiang Y, Huang Z R, et al. Strengthen the sugarcane nutrient management and reduce the sugarcane production cost[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011(23): 31–34
[18] 刀静梅, 郭家文, 崔雄维, 等. 不同供氮水平对甘蔗产量和品质的影响[J]. 中国糖料, 2011(2): 22–23
Dao J M, Guo J W, Cui X W, et al. Effects of different nitrogen application on yield and quality of sugarcane[J]. Sugar Crops of China, 2011(2): 22–23
[19] 章莹, 王建武, 王蕾, 等. 减量施氮与大豆间作对蔗田土壤温室气体排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1318–1327
Zhang Y, Wang J W, Wang L, et al. Effect of low nitrogen application and soybean intercrop on soil greenhouse gas emission of sugarcane field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(11): 1318–1327
[20] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7082–7090
Zhang X Q, Huang G Q, Bian X M, et al. Effects of intercropping on quality and yield of maize grain microorganism quantity, and enzyme activities in soils[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7082–7090
[21] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(5): 965–973
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and fababean[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(5): 965–973
[22] Li L, Zhang F S, Li X L, et al. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 65(1): 61–71
[23] Rochester I J, Peoples M B, Constable G A, et al. Faba beans and other legumes add nitrogen to irrigated cotton cropping systems[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1998, 38(3): 253–260
[24] 孟磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对土壤碳储量和作物固定碳的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 769–776
Meng L, Cai Z C, Ding W X. Carbon contents in soils and crops as affected by long-term fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 769–776
[25] 梁尧, 韩晓增, 乔云发, 等. 小麦–玉米–大豆轮作下黑土农田土壤呼吸与碳平衡[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 395–401
Liang Y, Han X Z, Qiao Y F, et al. Soil respiration and carbon budget in black soils of wheat-maize-soybean rotation system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 395–401
[26] 李志贤, 王建武, 杨文亭, 等. 甘蔗/大豆间作减量施氮对甘蔗产量、品质及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 713–719
Li Z X, Wang J W, Yang W T, et al. Effects of reduced nitrogen application on the yield, quality, and economic benefit of sugarcane intercropped with soybean[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 713–719
[27] 杨文亭, 李志贤, 舒磊, 等. 甘蔗//大豆间作和减量施氮对甘蔗产量、植株及土壤氮素的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6108–6115
Yang W T, Li Z X, Shu L, et al. Effect of sugarcane//soybean intercropping and reduced nitrogen rates on sugarcane yield, plant and soil nitrogen[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6108–6115
[28] Yang W T, Li Z X, Wang J W, et al. Crop yield, nitrogen acquisition and sugarcane quality as affected by interspecific competition and nitrogen application[J]. Field Crops Research, 2013, 146: 44–50
[29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000
[30] West T O, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: Methodology for full carbon cycle analyses[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 439–444
[31] Dyer L. Evaluation of soil chemical and physical characteristics in a complex agroecosystem in the Argentine Pampa[D]. Waterloo, Canada: University of Waterloo, 2010
[32] 万运帆, 林而达. 翻耕对冬闲农田 CH_4 和 CO_2 排放通量的影响初探[J]. 中国农业气象, 2004, 25(3): 8–10
Wan Y F, Lin E D. The influence of tillage on CH_4 and CO_2 emission flux in winter fallow cropland[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2004, 25(3): 8–10
[33] Willey R W. Intercropping — Its importance and research needs. Part Ⅰ: Competition and yield advantages[J]. Field Crops Abstracts, 1979, 32(2): 1–10
[34] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On-farm estimation of indigenous nitrogen supply for site-specific nitrogen management in the North China plain[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 81(1): 37–47
[35] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米–大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 474–482
Yong T W, Liu X M, Liu W Y, et al. Effects of reduced N application rate on yield and nutrient uptake and utilization in maize soy bean relay strip intercropping system[J]. Chinese

Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 474–482

[36] 张爱平, 杨世琦, 杨淑静, 等. 不同供氮水平对春小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 137–142
Zhang A P, Yang S Q, Yang S J, et al. Effect of N rates on yield of spring wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(17): 137–142

[37] Iqbal J, Hu R G, Lin S, et al. CO_2 emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 131(3/4): 292–302

[38] 张旭博, 徐明岗, 张文菊, 等. 添加有机物料后红壤CO_2释放特征与微生物生物量动态[J]. 中国农业科学, 2011, 44(24): 5013–5020
Zhang X B, Xu M G, Zhang W J, et al. Characteristics of CO_2 emission and microbial biomass dynamics after adding various organic materials in red soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(24): 5013–5020

[39] 陈琛, 严平, 韩辉邦, 等. 施肥对油菜主要生长期CH_4排放的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 121–124
Chen C, Yan P, Han H B, et al. Effects of fertilization on emission of CH_4 in whole rape growth period[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(15): 121–124

[40] 蔡祖聪. 水分类型对土壤排放的温室气体组成和综合温室效应的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(4): 484–491
Cai Z C. Effects of water regime on CO_2, CH_4 and N_2O emissions sand overall potential for greenhouse effect caused by emitted gases[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(4): 484–491

[41] Dick R P. A review: Long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1992, 40(1/4): 25–36

[42] Burton A J, Pregitzer K S, Crawford J N, et al. Simulated chronic NO_3^- deposition reduces soil respiration in Northern hardwood forests[J]. Global Change Biology, 2004, 10(7): 1080–1091

[43] DeForest J L, Zak D R, Pregitzer K S, et al. Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in Northern hardwood forests[J]. Soil Science Society of American Journal, 2004, 68(1): 132–138

[44] 黄晶, 李冬初, 刘淑军, 等. 长期施肥下红壤旱地土壤CO_2排放及碳平衡特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 602–610
Huang J, Li D C, Liu S J, et al. Characteristics of soil CO_2 emission and carbon balance under long-term fertilization in red soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 602–610

[45] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 18–24
Li Y K, Chen M P, Xia X, et al. Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(1): 18–24